

# 正交异性桥面板焊接质量影响要素研究

● 潘熙来



**[摘要]** 正交异性钢桥面板具备重量轻和承载极限高等特点,其在大中型桥梁结构中的运用日益广泛。我国许多在建或已完工的大跨度桥梁普遍选用了此类桥面板。本研究旨在探究正交异性钢桥面板的施工连接方式,包括焊接和栓接工艺,并分析这些连接方式对桥梁整体结构受力的影响。基于一个具体桥梁案例,本文深入分析了钢桥面板顶板的焊接工艺及横纵梁的高强度螺栓连接技术,并在确保连接质量和工程进度的前提下,设计了相应的施工流程,以期为类似工程提供借鉴和参考。

**[关键词]** 正交异性桥面板;焊接质量;面板焊接

面板、纵向加劲肋与横向加劲肋三者垂直相交,构成了正交异性钢桥面板,这些构件协同承担车轮载荷。该构造在纵向与横向均表现出显著的刚性,且在两个垂直方向上的刚性存在差异,从而导致其在构造上呈现出各向异性的特征。现行标准对栓接和焊接的混合接头施工有所说明。然而,由于正交异性桥梁的翼缘板宽度较大,高强度螺栓群集中分布,栓焊技术对结构初始内力的影响较大,导致施工的质量控制和难度增加。尽管焊接技术存在一定限制,栓焊技术仍在实际应用中占据重要地位,许多钢桁架结构的钢桥仍采用这一技术。这些桥梁大多数使用正交异性钢桥面板作为主要受力结构,而钢桥面板与其他受力构件的连接通常采用焊接方式,而横梁、纵向加劲肋与钢桥面板的连接则主要依赖栓接。

## Q 正交异性桥面板单元结构与施工特点

### (一) 结构形式

将预先制备的桥梁面板与竖向 U 型加劲肋相结合的组件,整体定义为异形正交桥面板单元。这种异形板结构主要由面板(包括上表面和下表面)、竖向 U 型加劲肋以及横向隔板组成。这些组件通常是按照桥梁的设计要求,在钢箱梁的制造过程中或者在工地安装阶段完成组装焊接作业。

### (二) 施工特点

(1) 随着桥梁规模的扩大,其构成的板单元数量也随之增加,导致施工量显著增大。例如,前述的几座桥梁项目中,在板单元的制作过程中都需要投入大量的劳动力和时间。

(2) 在施工过程中,根据桥梁的架设安装方案与设计规

范,可以选用统一标准的板单元进行规模化生产,这不仅能够有效降低生产成本,还能确保组件之间的互换性,提高施工效率。

(3) 预制板单元完成后,将直接用于桥面钢箱梁的组装或现场桥面系统的拼装。因此,必须严格控制制造的几何精度和平面度等形位误差,以确保桥梁建成后的精确度。

(4) 在焊接 U 形加劲肋的过程中,板单元将经历四种主要的焊接形变,包括纵向和横向的收缩形变、纵向面外的弯曲形变以及角形变。焊接过程中,U 形加劲肋的角焊缝及其附近的热影响区,在金属凝固和冷却过程中会产生收缩,导致板单元的形变。由于焊接仅在面板一侧进行,面板两侧的温度梯度使得 U 形加劲肋角焊缝一侧的收缩大于另一侧,从而在焊缝位置产生角形变。

## Q 正交异性桥面板焊接质量影响要素研究

一座横跨江面的重要桥梁,其首联结构设计为 70 米跨径加上八跨各 90 米的变截面箱梁,整体设计采用了预应力混凝土技术。在结构设计上,侧跨采用了钢与混凝土的混合体系,各部分的设计长度分别为:混凝土段 34 米、钢混凝土结合段 3.2 米以及钢箱段 48.48 米。桥面板和横隔板的厚度分别为 16 毫米和 10 毫米,桥面宽度为 20.5 米。桥面铺装由 10 厘米厚的沥青混凝土层和 8 厘米厚的 C40 混凝土层组成。桥梁的桁架结构采用散件拼装法进行架设,墩顶节点的钢梁通过塔吊安装,而其余部分则利用全回转式梁架吊机进行对称架设。

## Q U 肋焊接工艺研发

随着设计标准的提高和科技的进步,工程师们对正交异

性 U 型肋焊接技术的研究不断深入,他们通过实验和实际施工经验,成功研发出多套 U 型肋焊接技术方案。

#### (一)药芯焊丝 CO<sub>2</sub> 气体保护焊

(1)在 20 世纪 90 年代初期,某重要桥梁工程启动建设,正交异性桥面板单元的制造当时尚未有既定的标准与成熟经验可供参考。设计方案中对于 U 型肋的焊接深度并未做出具体规定,仅对其外观特征提出了基本要求。面对这些特定的技术指标,生产方开发了一套适用于金属粉末型 CO<sub>2</sub> 气体保护焊丝的横向焊接方法。在该工艺中,U 型肋的焊接选用了金属粉末芯焊丝(规格为 MX-200、直径 1.6 毫米),并进行两层焊接操作。焊丝的干伸长长度控制在 20~25 毫米之间,气体流量设定为每分钟 25 升。具体 U 型肋焊接参数见表 1。

表 1 U 肋焊接参数

| 焊道 | 焊接电流/A  | 电弧电压/V | 焊接速度/mm·min <sup>-1</sup> |
|----|---------|--------|---------------------------|
| 1  | 260~280 | 32~34  | 650~700                   |
| 2  | 300~320 | 28~30  | 450~500                   |

#### (2)船位焊接工艺

鉴于工程中 U 型肋角焊缝出现开裂问题,桥梁设计与研究机构开始对正交各向异性桥面板的耐疲劳特性进行深入研究,并得出了以下结论:U 型肋的熔透深度需应达到其板厚的 75%~80%,同时要避免焊接缺陷的产生。为此,国内多家制造企业纷纷研发了 U 型肋焊接的新工艺,并认为船位焊接法有助于提高焊缝的外观质量。因此,专门设计了适用于 U 肋焊接的船型夹具,并采用药芯焊丝 CO<sub>2</sub> 气体保护焊技术,配合跟踪小车完成焊接作业。对于厚度为 8 毫米的 U 型肋焊缝,使用直径为 1.6 毫米的焊丝进行单道焊接,或使用直径为 1.2 毫米的焊丝进行双道焊接,焊接时船位角度应为 30 度。所用药芯焊丝型号为 E501T-1,焊丝的干伸长长度控制在 20~25 毫米,气体流量设定为每分钟 25 升。药芯焊丝船位焊接 U 型肋的工艺参数见表 2。

表 2 药芯焊丝船位焊接 U 肋工艺参数

| 焊丝规格 φ/mm | 焊道 | 焊接电流/A  | 电弧电压/V |
|-----------|----|---------|--------|
| 1.6       | 1  | 320~340 | 32~34  |
| 1.2       | 1  | 280~320 | 30~32  |
|           | 2  | 280~320 | 32~34  |

#### (二)实芯焊丝混合气体保护焊

由于药皮焊丝熔池深度较浅,焊丝对准焊缝底部时容易导致熔透不足,而偏离底部又会造成无法与底部实现熔接。为了解决这一问题,生产商利用实心焊丝熔深较大的优势,研发了实心焊丝气体保护焊接技术。然而,使用实心焊丝搭配 CO<sub>2</sub> 气体保护时,焊接过程中会产生较多飞溅,使得焊缝表面的清理工作变得复杂,同时焊接飞溅也容易堵塞喷嘴出口,若焊接过程中 CO<sub>2</sub> 气体保护不足,则容易出现表

面气孔或断弧问题,导致焊接接头数量增加。改用实心焊丝并配合富氩混合气体(按体积比 80% 氩气加 20%CO<sub>2</sub>)进行保护焊接,可以有效减少飞溅现象,并在船形位置焊接 U 型肋部焊缝时,相比药皮焊丝 CO<sub>2</sub> 气体保护焊接,更容易确保底部熔接质量。

在进行 U 型肋焊接的过程中,采用实芯焊丝搭配混合气体进行焊接的工艺流程如下:U 型肋的坡口处理与药芯焊丝 CO<sub>2</sub> 气体保护焊接工艺相同。采用 φ1.6mm 的 ER50-6 型号实芯焊丝进行单道焊接,焊丝的干伸长长度控制在 20~25 毫米之间,同时气体的流量维持在每分钟 25 升。具体的实芯焊丝船位焊接 U 型肋的工艺参数见表 3。使用实芯焊丝混合气体(按体积比 80% 氩气与 20% 二氧化碳)进行船位焊接 U 型肋焊接时,工艺要点与药芯焊丝 CO<sub>2</sub> 气体保护焊接方法一致。

表 3 实芯焊丝船位焊接 U 肋工艺参数

| 规格 φ/mm | 焊道 | 焊接电流/A  | 电弧电压/V | 焊接速度/mm·min <sup>-1</sup> |
|---------|----|---------|--------|---------------------------|
| 1.6     | 1  | 300~340 | 26~28  | 300~340                   |

#### (三)双丝混合焊

尽管这两种 U 肋焊接方法都能够达到 U 型肋焊缝的设计标准,但在实际操作中,对技术细节的要求极其严格,因此,施工过程的管理与控制较为复杂。为了解决这些问题,制造厂商开发了一款专用的 U 型肋双丝焊接设备。该设备配置了一个机械臂,机械臂上安装了前后排列的两套送丝系统(分别为前丝和后丝),并搭载了两组独立的供气系统。U 型肋的坡口设计与药芯焊丝 CO<sub>2</sub> 气体保护焊的船位焊接坡口相同。在焊接过程中,焊丝的干伸长和气体流量遵循药芯焊丝 CO<sub>2</sub> 气体保护焊船位焊接的标准,前丝使用直径为 1.2mm 的实心焊丝,后丝则使用直径为 1.6mm 的药芯焊丝,执行横位焊接作业。

### Q 正交异性桥面板焊接工艺及关键技术措施

#### (一)关键工序工艺说明

(1)在具体的工程实践中,我们打造了一款专业的划线操作台,该设备搭载了智能对位系统。板材自动归位至中心后,操作者可根据操作台预设的标记点,绘制出部件的纵横定位线、结构组装检验线及端口审核线。(2)U 型肋的组装工作在高精度的 U 型肋装配机上完成,无需使用马架。在装配流程启动前,板材通过自动对中系统进行定位和固定,U 型肋的装配则是从面板中段向两侧自由端推进。装配支架配备了钢板自动对中定位系统,极大提高了钢板吊装精度。(3)U 型肋的角焊缝焊接在预变形的亚船形旋转焊接支架上完成,关键技术如下:①利用反变形预压设备对部件进行预压处理,确保部件与支架的紧密贴合,并通过夹具

固定。反变形的施加和解除均由该设备自动完成。根据部件的变形趋势,预压量通过过往的变形数据统计分析、理论计算及实验结果综合确定。②在亚船形旋转焊接支架上,采用CO<sub>2</sub>气体保护自动焊机对U型肋角焊缝进行焊接,需要注意焊接的顺序,通常采取从一端向另一端平行对称的方式进行。U型肋与面板的角焊缝接头坡口形式和主要焊接参数通常根据桥梁的具体要求和焊接工艺评定试验的结果来确定。(4)单元件吊装到矫正/检验平台上,对其平面度和板边的直线度进行检查。

## (二)关键技术措施

### 1.无余量下料技术

在焊接、热矫正及坡口切割等工序中,钢材不可避免地产 生一定程度的收缩。传统的板单元生产中常在下料时常预留额外材料以补偿收缩,这种做法虽然确保了加工的可行性,但也导致了材料的浪费和成本的增加。针对这一问题,笔者在工程实践中,汲取了长江流域桥梁钢结构制造的宝贵经验,并在西河桥项目中应用了无余量数控切割下料技术。该技术通过精确控制下料尺寸,合理预留材料富余量,既有效应对了制造过程中的收缩问题,又大幅减少了材料浪费。观察板单元生产全流程发现,焊接环节的收缩占据了总收缩的大部分,因此,掌握焊接收缩规律是无余量下料技术的核心。对于常见的正交异性板单元,影响焊接变形关键因素包括面板的厚度、U型肋角焊缝的热量输入及焊缝长度。

### 2.反变形控制技术

(1)准确测定角变形幅度。在实施正交异性板单元U型肋的焊接作业时,焊缝附近常出现角变形现象。掌握确切的角变形程度是实施逆向变形焊接技术的前提。(2)应用逆向变形焊接专用夹具。在多项工程应用中,通过使用逆向变形的亚船形焊接旋转支架等专用夹具对U形肋角焊缝进行焊接,取得了以下成效:①控制焊接变形。支架设计有预置拱度,利用逆向变形施压机构和夹具确保组件与支架模板紧密贴合,从而实现逆向变形效果。配合低热输入的

CO气体保护自动焊接技术,组件的横向角变形和挠曲变形得到了有效抑制。②保障焊接质量。焊缝位于亚船形位置(与水平面的夹角约为25°),焊枪精确对准焊缝坡口底部,提升了U型肋的熔透率,确保焊缝外观平滑,并有效防止了咬边和溢流等焊接缺陷。③减少起吊次数。旋转支架便于操作,焊接完成一侧的亚船形焊缝后,只需解锁并旋转50°后重新锁定,便可对另一侧焊缝进行焊接,从而避免了传统固定船形支架换侧时的起吊操作,提高了作业效率。

## Q 结束语

通过对正交异性钢桥面板结构与焊接施工问题的探讨,发现焊接过程中焊缝与高强度螺栓共同承受结构载荷。当连接方式由栓接变为焊接后,可能导致垂直于腹板的平面外变形,进而加剧高强度螺栓轴力的损耗。在进行正交异性钢桥面板的焊接施工时,关键在于根据初始应力场的分布以及后期荷载的叠加情况,合理决定打底焊接与高强度螺栓拧紧的顺序。考虑到施工人员较为充足但高强度螺栓资源紧张的现状,本桥梁采用了文中提出的先栓接后焊接的施工工艺与构造系统。焊接完成后,及时对高强度螺栓进行了再次拧紧,且螺栓数量保持不变,从而有效控制了焊接质量。

## 参考文献

- [1]张清华,竺乐天,李明哲,等.基于多失效模式损伤度相容的钢桥面板抗疲劳设计方法[J].土木工程学报,2022,55(12):80-93.
- [2]赵毅,王恒,李力,等.正交异性钢桥面板裂纹成因分析及疲劳性能改善措施综述[J].公路交通技术,2022,38(06):37-42.
- [3]李文武,秦泗凤,王玉鹏.车轮横向分布对正交异性钢桥面板疲劳性能的影响[J].沈阳大学学报(自然科学版),2021,33(06):502-508.

## 作者简介:

潘熙来(1999—),男,汉族,辽宁沈阳人,硕士研究生,重庆交通大学,研究方向:U型肋焊接抗疲劳技术。